



С. П. Санников

# МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ

Самостоятельная работа № 3

Екатеринбург  
2012

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФГБОУ ВПО «Уральский государственный лесотехнический университет»

Кафедра автоматизации производственных процессов

С. П. Санников

# **МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ**

Методические указания для самостоятельной работы № 3  
Направление ВПО 220300, 220200, 220400, 220700

Екатеринбург  
2012

# Электронный архив УГЛТУ

Рассмотрены и рекомендованы к изданию методической комиссией  
лесоинженерного факультета УГЛТУ  
Протокол № 1 от 8.09.11 г.

Рецензент: Ордуянц Г. Г., доц. каф. АПП, канд. техн. наук

Редактор Л. Д. Черных  
Оператор компьютерной верстки Т. В. Упорова

---

Подписано в печать 17.05.12		Формат 60×84 1/16
Плоская печать	Заказ №	Тираж 50 экз.
Поз. 6	Печ. л. 1,39	Цена 7 руб. 08 коп.

---

Редакционно-издательский отдел УГЛТУ  
Отдел оперативной полиграфии УГЛТУ

Занятия 7, 8

### **3. ФОРМАЛИЗАЦИЯ И АЛГОРИТМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМ**

#### **3.1. Методика разработки и машинной реализации моделей систем**

Сущность машинного моделирования системы состоит в проведении на вычислительной машине эксперимента с моделью, которая представляет собой некоторый программный комплекс, описывающий формально и (или) алгоритмически поведение элементов системы в процессе ее функционирования, т.е. в их взаимодействии друг с другом и внешней средой.

**Требования пользователя к модели.** Основные требования, предъявляемые к модели процесса функционирования системы:

1. Полнота модели должна предоставлять пользователю возможность получения необходимого набора оценок характеристик системы с требуемой точностью и достоверностью.

2. Гибкость модели должна давать возможность воспроизведения различных ситуаций при варьировании структуры, алгоритмов и параметров системы.

3. Длительность разработки и реализации модели большой системы должна быть по возможности минимальной при учете ограничений на имеющиеся ресурсы.

4. Структура модели должна быть блочной, т.е. допускать возможность замены, добавления и исключения некоторых частей без переделки всей модели.

5. Информационное обеспечение должно предоставлять возможность эффективной работы модели с базой данных систем.

6. Программные и технические средства должны обеспечивать эффективную (по быстродействию и памяти) машинную реализацию модели и удобное общение с ней пользователя.

7. Должно быть реализовано проведение целенаправленных (планируемых) машинных экспериментов с моделью системы с использованием аналитико-имитационного подхода при наличии ограниченных вычислительных ресурсов.

При машинном моделировании системы  $S$  характеристики процесса ее функционирования определяются на основе модели  $M$ , построенной исходя из имеющейся исходной информации об объекте моделирования. При получении новой информации об объекте его модель пересматривается и уточняется с учетом новой информации, т.е. процесс моделирования, включая разработку и машинную реализацию модели, является

итерационным. Этот итерационный процесс продолжается до тех пор, пока не будет получена модель  $M$ , которую можно считать адекватной в рамках решения поставленной задачи исследования и проектирования системы  $S$ .

Моделирование систем с помощью ЭВМ можно использовать в следующих случаях:

а) для исследования системы  $S$  до того, как она спроектирована, с целью определения чувствительности характеристики к изменениям структуры, алгоритмов и параметров объекта моделирования и внешней среды;

б) на этапе проектирования системы  $S$  для анализа и синтеза различных вариантов системы и выбора среди конкурирующих такого варианта, который удовлетворял бы заданному критерию оценки эффективности системы при принятых ограничениях;

в) после завершения проектирования и внедрения системы, т.е. при ее эксплуатации, для получения информации, дополняющей результаты натурных испытаний (эксплуатации) реальной системы, и для получения прогнозов эволюции (развития) системы во времени.

**Этапы моделирования систем.** Основные этапы моделирования системы:

- построение концептуальной модели системы и ее формализация;
- алгоритмизация модели системы и ее машинная реализация;
- получение и интерпретация результатов моделирования системы.

Взаимосвязь этапов моделирования систем и их составляющих (подэтапов) представлена на рис. 3.1.

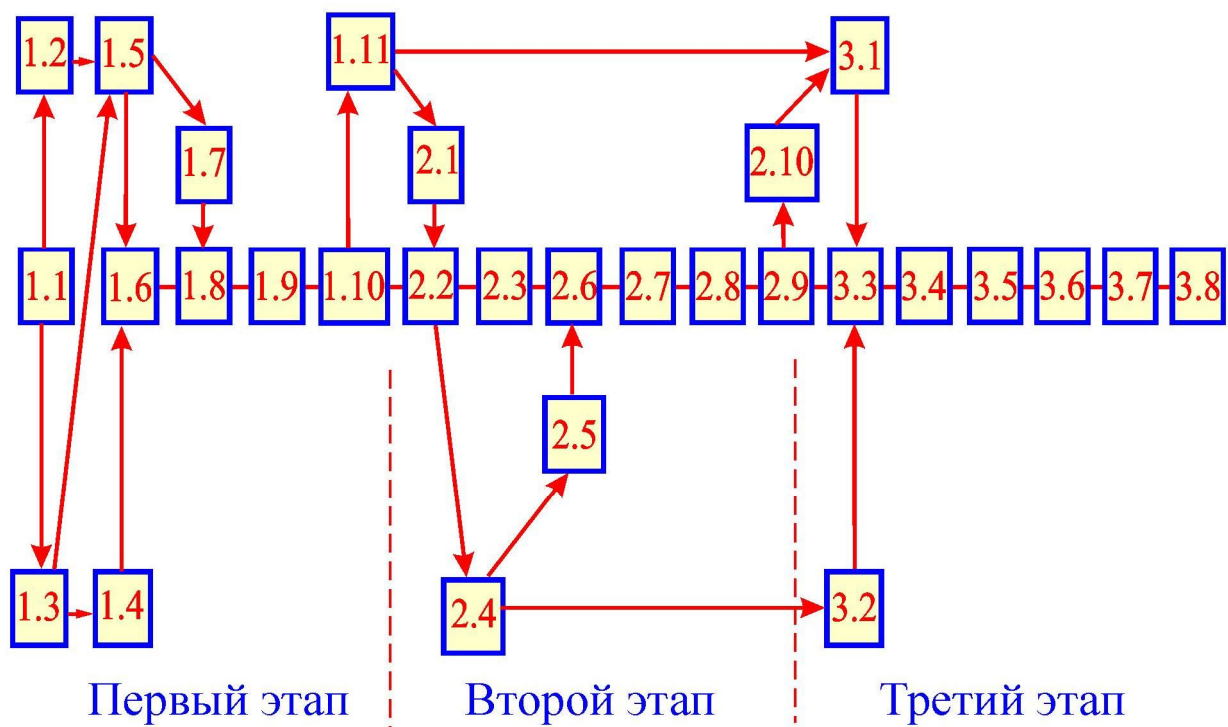


Рис. 3.1. Взаимосвязь этапов моделирования систем. Основные подэтапы:

- 1.1 — формулировка цели и постановка задачи машинного моделирования системы;
- 1.2 — анализ задачи моделирования системы;
- 1.3 — определение требований к исходной информации об объекте моделирования и организация ее сбора;
- 1.4 — выдвижение гипотез и принятие предположений;
- 1.5 — определение параметров и переменных модели;
- 1.6 — установление основного содержания модели;
- 1.7 — обоснование критериев оценки эффективности системы;
- 1.8 — определение процедур аппроксимации;
- 1.9 — описание концептуальной модели системы;
- 1.10 — проверка достоверности концептуальной модели;
- 1.11 — составление технической документации по первому этапу;
- 2.1 — построение логической схемы модели;
- 2.2 — получение математических соотношений;
- 2.3 — проверка достоверности модели системы;
- 2.4 — выбор инструментальных средств для моделирования;
- 2.5 — составление плана выполнения работ по программированию;
- 2.6 — спецификация и построение схемы программы;
- 2.7 — верификация и проверка достоверности схемы программы;
- 2.8 — проведение программирования модели;
- 2.9 — проверка достоверности программы;
- 2.10 — составление технической документации по второму этапу;
- 3.1 — планирование машинного эксперимента с моделью системы;
- 3.2 — определение требований к вычислительным средствам;
- 3.3 — проведение рабочих расчетов;
- 3.4 — анализ результатов моделирования системы;
- 3.5 — представление результатов моделирования;
- 3.6 — интерпретация результатов моделирования;
- 3.7 — подведение итогов моделирования и выдача рекомендаций;
- 3.8 — составление технической документации по третьему этапу

Таким образом, на этапе построения концептуальной модели  $M_K$  и ее формализации проводится исследование моделируемого объекта с точки зрения выделения основных составляющих процесса его функционирования, определяются необходимые аппроксимации, и получается обобщенная схема модели системы  $S$ , которая преобразуется в машинную модель  $M_M$  на втором этапе моделирования путем последовательной алгоритмизации и программирования модели. Последний, третий, этап моделирования системы сводится к проведению согласно полученному плану рабочих расчетов на ЭВМ с использованием выбранных программно-технических средств, получению и интерпретации результатов моделирования системы  $S$  с учетом воздействия внешней среды  $E$ .

### 3.2. Построение и формализация концептуальных моделей систем

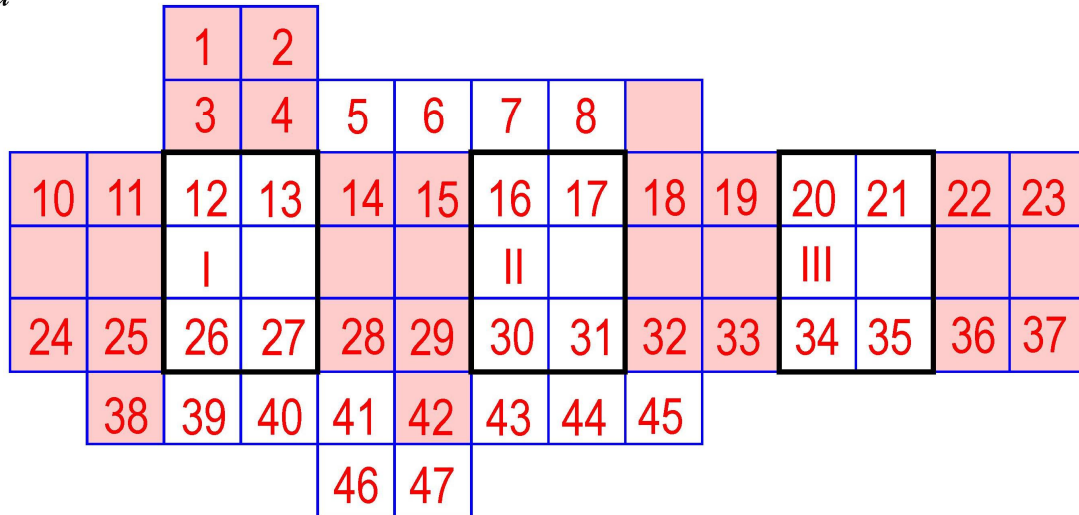
На первом этапе машинного моделирования — построения *концептуальной модели*  $M$  системы  $S$  и ее формализации — формулируется модель и строится ее формальная схема, т.е. основным назначением этого этапа является переход от содержательного описания объекта к его математической модели, другими словами, процесс формализации. Необходимо, во-первых, провести границы между системой  $S$  и внешней средой  $E$ , далее — упростить описание системы и построить сначала концептуальную, а затем формальную модели системы. Модель должна быть адекватной, т.е. с определенной степенью приближения на уровне понимания моделируемой системы  $S$  разработчиком. Модель должна отражать процесс ее функционирования во внешней среде  $E$ .

**Переход от описания к блочной модели.** Наиболее рационально строить модель функционирования системы по блочному принципу. При этом могут быть выделены три автономные группы блоков такой модели. Блоки первой группы представляют собой имитатор воздействий внешней среды  $E$  на систему  $S$ ; блоки второй группы являются собственно моделью процесса функционирования исследуемой системы  $S$ ; блоки третьей группы — вспомогательные и служат для машинной реализации блоков двух первых групп, а также для фиксации и обработки результатов моделирования.

Рассмотрим механизм перехода от описания процесса функционирования некоторой гипотетической системы к модели этого процесса. Описание свойств процесса функционирования системы  $S$  представим в виде концептуальной модели  $M_K$  как совокупности некоторых элементов, условно изображенных квадратами на рис. 3.2, *а*, и некоторой целевой функции.

Эти квадраты представляют собой описание некоторых подпроцессов исследуемого процесса функционирования системы  $S$ , воздействия внешней среды  $E$  и т.д. Переход от описания системы к ее модели согласно целевой функции сводится к исключению из рассмотрения некоторых второстепенных элементов описания (элементы 5-8, 39-41, 43-47). Предполагается, что они не оказывают существенного влияния на ход процессов, исследуемых с помощью модели. Часть элементов (14, 15, 28, 29, 42) заменяется пассивными связями  $h_1$ , отражающими внутренние свойства системы (рис. 3.2, *б*). Некоторая часть элементов (1-4, 10, 11, 24, 25) заменяется входными факторами  $x$  и воздействиями внешней среды  $v_1$ . Возможны и комбинированные замены: элементы 9, 18, 19, 32, 33 заменены пассивной связью  $h_2$  и воздействием внешней среды  $E$   $v_2$ . Элементы 22, 23, 36, 37 отражают воздействие системы на внешнюю среду  $y$ .

*a*



*б*

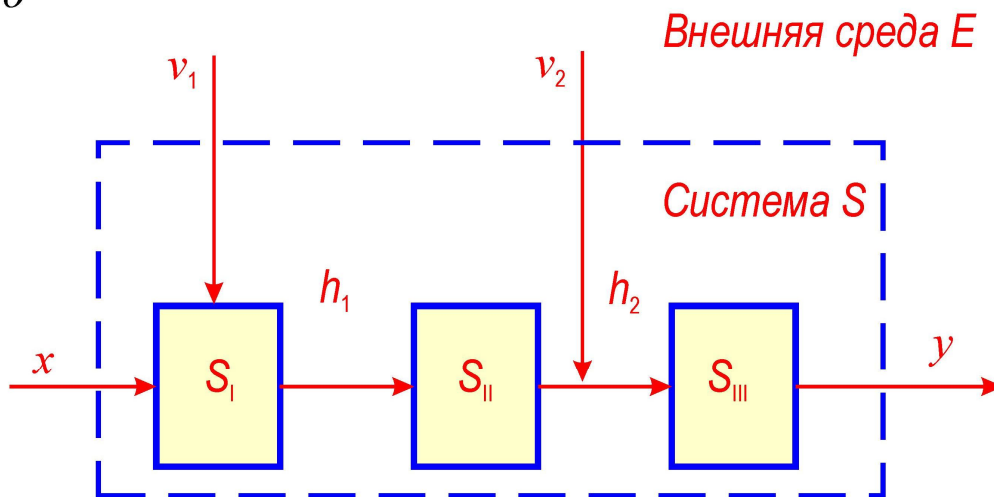


Рис. 3.2. Концептуальная модель системы:  
*a* – описательная; *б* – блочная (структурная)

Оставшиеся элементы системы  $S$  группируются в блоки  $S_I$ ,  $S_{II}$ ,  $S_{III}$ , отражающие процесс функционирования исследуемой системы. Поведение этих блоков должно быть хорошо изучено и для каждого из них построена математическая модель, которая может содержать ряд подблоков. Построенная *блочная (структурная) модель* процесса функционирования исследуемой системы  $S$  предназначена для анализа характеристик этого процесса, который может быть проведен при машинной реализации полученной модели согласно заданной целевой функции.

**Математические модели процессов.** После перехода от описания моделируемой системы  $S$  к ее модели  $M_K$ , построенной по блочному принципу, необходимо построить математические модели процессов, происходящих в различных блоках. Математическая модель представляет собой совокупность соотношений (например, уравнений, логических условий,



операторов), определяющих характеристики процесса функционирования системы  $S$  в зависимости от структуры системы, алгоритмов поведения, параметров системы, воздействий внешней среды  $E$ , начальных условий и времени. Математическая модель является результатом формализации процесса функционирования исследуемой системы.

Формально процесс функционирования некоторой гипотетической системы  $S$  можно представить в виде  $m$  подсистем с характеристиками  $y_1(t), y_2(t), \dots, y_{nY}(t)$  с параметрами  $h_1, h_2, \dots, h_{nH}$  при наличии входных воздействий  $x_1, x_2, \dots, x_{nX}$  и воздействий внешней среды  $v_1, v_2, \dots, v_{nV}$ .

Тогда математической моделью процесса может служить система соотношений вида

[illegible]

Если бы функции  $f_1, f_2, \dots, f_m$  были известны, то соотношения в системе оказались бы идеальной математической моделью процесса функционирования системы  $S$ . Обычно процесс функционирования системы  $S$  разбивают на ряд элементарных подпроцессов. Сущность формализации подпроцессов состоит в подборе типовых математических схем. Например, для стохастических процессов это могут быть схемы вероятностных автоматов ( $P$ -схемы), схемы массового обслуживания ( $Q$ -схемы) и т. д.

**Подэтапы первого этапа моделирования.** Рассмотрим более подробно основные подэтапы построения концептуальной модели  $M_K$  системы и ее формализации (см. рис. 3.1)

1. *Формулировка цели и постановка задачи машинного моделирования системы.* Дается четкая формулировка задачи, цели и постановка исследования конкретной системы  $S$ . Основное внимание уделяется таким вопросам, как: а) признание существования цели и необходимости машинного моделирования; б) выбор методики решения задачи с учетом имеющихся ресурсов; в) определение масштаба задачи и возможности разбиения ее на подзадачи. В процессе моделирования возможен пересмотр начальной постановки задачи в зависимости от цели моделирования и цели функционирования системы.

2. *Анализ задачи моделирования системы.* Анализ включает следующие вопросы: а) выбор критериев оценки эффективности процесса функционирования системы  $S$ ; б) определение эндогенных и экзогенных

переменных модели  $M$ ; в) выбор возможных методов идентификации; г) выполнение предварительного анализа содержания второго этапа алгоритмизации модели системы и ее машинной реализации; д) выполнение предварительного анализа содержания третьего этапа получения и интерпретации результатов моделирования системы.

3. *Определение требований к исходной информации об объекте моделирования и организация ее сбора.* После постановки задачи моделирования системы  $S$  определяются требования к информации, из которой получают качественные и количественные исходные данные, необходимые для решения этой задачи. На этом подэтапе проводится: а) выбор необходимой информации о системе  $S$  и внешней среде  $E$ ; б) подготовка априорных данных; в) анализ имеющихся экспериментальных данных; г) выбор методов и средств предварительной обработки информации о системе.

4. *Выдвижение гипотез и принятие предположений.* Гипотезы при построении модели системы  $S$  служат для заполнения пробелов в понимании задачи исследователем. Выдвигаются также гипотезы относительно возможных результатов моделирования системы  $S$ , справедливость которых проверяется при проведении машинного эксперимента. Предположения предусматривают, что некоторые данные неизвестны или их нельзя получить. Предположения могут выдвигаться относительно известных данных, которые не отвечают требованиям решения поставленной задачи. Предположения дают возможность провести упрощения модели в соответствии с выбранным уровнем моделирования. При выдвижении гипотез и принятии предположений учитываются следующие факторы: а) объем имеющейся информации для решения задач; б) подзадачи, для которых информация недостаточна; в) ограничения ресурсов времени для решения задач; г) ожидаемые результаты моделирования.

5. *Определение параметров и переменных модели.* Прежде чем перейти к описанию математической модели, необходимо определить параметры системы, входные и выходные переменные, воздействия внешней среды и оценить степени их влияния на процесс функционирования системы в целом. Описание каждого параметра и переменной должно даваться в следующей форме: а) определение и краткая характеристика; б) символ обозначения и единица измерения; в) диапазон изменений; г) место применения в модели.

6. *Установление основного содержания модели.* На этом подэтапе определяется основное содержание модели и выбирается метод построения модели системы, которые разрабатываются на основе принятых гипотез и предположений. При этом учитываются следующие особенности: а) формулировка цели и постановка задачи моделирования системы; б) структура системы  $S$  и алгоритмы ее поведения, воздействия внешней среды  $E$ ; в) возможные методы и средства решения задачи моделирования.

7. *Обоснование критериев оценки эффективности системы.* Для оценки качества процесса функционирования моделируемой системы необходимо определить совокупность критериев оценки эффективности как функцию параметров и переменных системы. Эта функция представляет собой поверхность отклика в исследуемой области изменения параметров и переменных и позволяет определить реакцию системы.

8. *Определение процедур аппроксимации.* Для аппроксимации реальных процессов, протекающих в системе  $S$ , обычно используются три вида процедур: а) детерминированная; б) вероятностная; в) определение средних значений.

При детерминированной процедуре результаты моделирования однозначно определяются по данной совокупности входных воздействий, параметров и переменных системы  $S$ . В этом случае отсутствуют случайные элементы, влияющие на результаты моделирования.

Вероятностная (рандомизированная) процедура применяется в том случае, когда случайные элементы, включая воздействия внешней среды  $E$ , влияют на характеристики процесса функционирования системы  $S$  и когда необходимо получить информацию о законах распределения выходных переменных.

Процедура определения средних значений используется, когда при моделировании системы интерес представляют средние значения выходных переменных при наличии случайных элементов.

9. *Описание концептуальной модели системы.* На этом подэтапе построения модели системы: а) описывается концептуальная модель  $M_K$  в абстрактных терминах и понятиях; б) задается целевая функция; в) дается описание модели с использованием типовых математических схем; г) принимаются окончательно гипотезы и предположения; д) обосновывается выбор процедуры аппроксимации реальных процессов при построении модели.

10. *Проверка достоверности концептуальной модели.* После того как концептуальная модель  $M_K$  описана, необходимо проверить достоверность некоторых концепций модели перед тем как перейти к следующему этапу моделирования системы  $S$ . Один из методов проверки модели  $M_K$  – применение операций обратного перехода, позволяющих проанализировать модель, вернуться к принятым аппроксимациям и, наконец, рассмотреть снова реальные процессы, протекающие в моделируемой системе. Проверка достоверности концептуальной модели  $M_K$  должна включать: а) проверку замысла модели; б) оценку достоверности исходной информации; в) рассмотрение постановки задачи моделирования; г) анализ принятых аппроксимаций; д) исследование гипотез и предположений.

11. *Составление технической документации по первому этапу.* В конце этапа построения концептуальной модели  $M_K$  и ее формализации

составляется технический отчет по этапу, который включает в себя: а) подробную постановку задачи моделирования системы  $S$ ; б) анализ задачи моделирования системы; в) критерии оценки эффективности системы; г) параметры и переменные модели системы; д) гипотезы и предположения, принятые при построении модели; е) описание модели в абстрактных терминах и понятиях; ж) описание ожидаемых результатов моделирования системы  $S$ .

### 3.3. Алгоритмизация моделей систем и их машинная реализация

На втором этапе моделирования — этапе алгоритмизации модели и ее машинной реализации — математическая модель, сформированная на первом этапе, воплощается в конкретную машинную модель.

**Принципы построения моделирующих алгоритмов.** Процесс функционирования системы  $S$  можно рассматривать как последовательную смену ее состояний  $z = z(z_1(t), z_2(t), \dots, z_k(t))$  в  $k$ -мерном пространстве. Очевидно, что задачей моделирования процесса функционирования исследуемой системы  $S$  является построение функций  $z$ , на основе которых можно провести вычисление интересующих характеристик процесса функционирования системы. Для этого должны иметься соотношения, связывающие функции  $z$  с переменными, параметрами и временем, а также начальные условия  $z_0 = z(z_1(t_0), z_2(t_0), \dots, z_k(t_0))$  в момент времени  $t = t_0$ .

Для детерминированной системы  $S_D$ , в которой отсутствуют случайные факторы, состояние процесса в момент времени  $t_0 + j\Delta t$  может быть однозначно определено из соотношений математической модели по известным начальным условиям. Если шаг  $\Delta t$  достаточно мал, то таким путем можно получить приближенные значения  $z$ .

Для стохастической системы  $S_R$ , т.е. системы, на которую оказывают воздействия случайные факторы, функция состояний процесса  $z$  в момент времени  $\tau \leq t$  и соотношения модели, определяют лишь распределение вероятностей для  $z_i(t + \Delta t)$  в момент времени  $t + \Delta t$ . В общем случае и начальные условия  $z^0$  могут быть случайными, задаваемыми соответствующим распределением вероятностей. При этом структура моделирующего алгоритма для стохастических систем соответствует детерминированной системе. Только вместо состояния  $z_i(t + \Delta t)$  необходимо вычислять распределение вероятностей для возможных состояний.

Такой принцип построения моделирующих алгоритмов называется *принципом  $\Delta t$* . Это наиболее универсальный принцип, позволяющий определить последовательные состояния процесса функционирования

системы  $S$  через заданные интервалы времени  $\Delta t$ . Но с точки зрения затрат машинного времени он иногда оказывается неэкономичным.

При рассмотрении процессов функционирования некоторых систем можно обнаружить, что для них характерны два типа состояний: 1) особые, присущие процессу функционирования системы только в некоторые моменты времени (моменты поступления входных или управляющих воздействий, возмущений внешней среды и т.п.); 2) неособые, в которых процесс находится все остальное время. Особые состояния характерны еще и тем, что функции состояний  $z_i(t)$  в эти моменты времени изменяются скачком, а в неособых состояниях изменение координат  $z_i(t)$  происходит плавно и непрерывно или не происходит совсем. Таким образом, следя при моделировании системы  $S$  только за ее особыми состояниями в те моменты времени, когда эти состояния имеют место, можно получить информацию, необходимую для построения функции  $z_i(t)$ . Очевидно, для описанного типа систем могут быть построены моделирующие алгоритмы по «принципу особых состояний». Обозначим скачкообразное (релейное) изменение состояния  $z$  как  $\delta z$ , а «принцип особых состояний» — как *принцип  $\delta z$* .

Принцип  $\delta z$  дает возможность для ряда систем существенно уменьшить затраты машинного времени на реализацию моделирующих алгоритмов по сравнению с принципом  $\Delta t$ . Логика построения моделирующего алгоритма, реализующего принцип  $\delta z$ , отличается от рассмотренной для принципа  $\Delta t$  только тем, что включает в себя процедуру определения момента времени  $t_\delta$ , соответствующего следующему особому состоянию системы  $S$ . Для исследования процесса функционирования больших систем рационально использование комбинированного принципа построения моделирующих алгоритмов, сочетающих в себе преимущества каждого из рассмотренных принципов.

**Формы представления моделирующих алгоритмов.** Удобной формой представления логической структуры моделей является схема. На различных этапах моделирования составляются обобщенные и детальные логические схемы моделирующих алгоритмов, а также схемы программ.

*Обобщенная (укрупненная) схема моделирующего алгоритма* задает общий порядок действий при моделировании систем без каких-либо уточняющих деталей. Обобщенная схема показывает, что необходимо выполнить на очередном шаге моделирования.

*Детальная схема моделирующего алгоритма* содержит уточнения, отсутствующие в обобщенной схеме. Детальная схема показывает не только то, что следует выполнить на очередном шаге моделирования системы, но и как это выполнить.

*Логическая схема моделирующего алгоритма* представляет собой логическую структуру модели процесса функционирования системы  $S$ . Логиче-

ческая схема указывает упорядоченную во времени последовательность логических операций, связанных с решением задачи моделирования.

Схема программы отображает порядок программной реализации моделирующего алгоритма с использованием конкретных математического обеспечения и алгоритмического языка.

Логическая схема алгоритма и схема программы могут быть выполнены как в укрупненной, так и в детальной форме. Наиболее употребительные в практике моделирования на ЭВМ символы показаны на рис. 3.3, где изображены основные, специфические и специальные символы процесса.

Пример изображения схемы моделирующего алгоритма показан на рис. 3.3, з.

Обычно схема является наиболее удобной формой представления структуры моделирующих алгоритмов, например в виде *граф-схемы* (рис. 3.3, и). Здесь  $H_i$  — начало,  $K_i$  — конец,  $B_i$  — вычисление,  $\Phi_i$  — формирование,  $\Pi_i$  — проверка условия,  $C_i$  — счетчик,  $P_i$  — выдача результата,  $i = \overline{1, g}$ , где  $g$  — общее число операторов моделирующего алгоритма. В качестве пояснения к граф-схеме алгоритма в тексте дается раскрытие содержания операторов, что позволяет упростить представление алгоритма, но усложняет работу с ним.

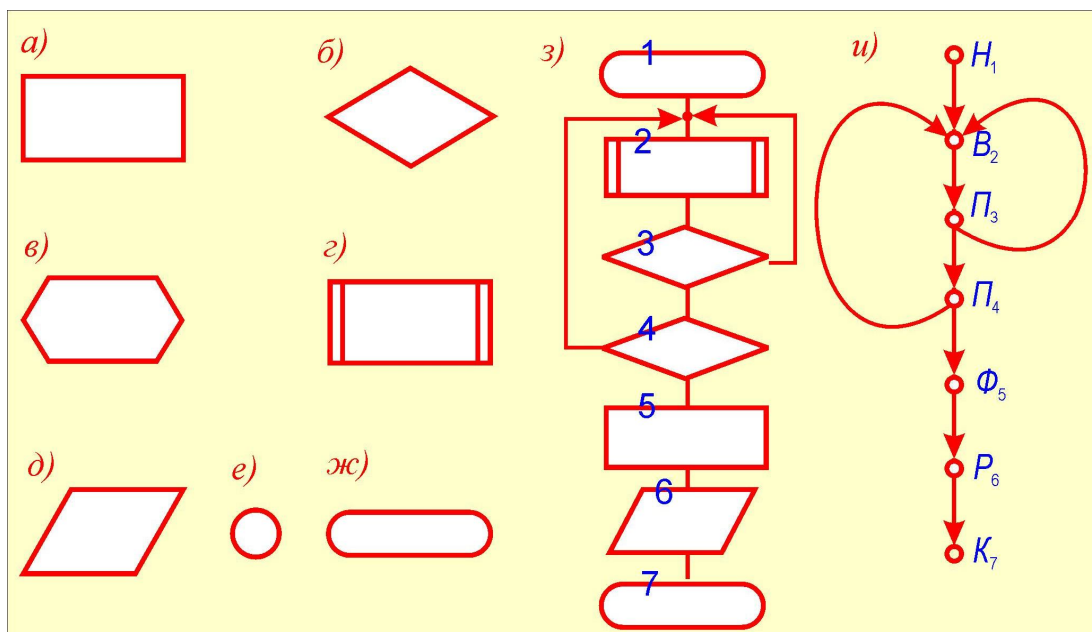


Рис. 3.3. Символы и схемы моделирующих алгоритмов:  
 основной символ: а — процесс;  
 специфические символы процесса: б — решение, в — подготовка,  
 г — predetermined процесс, д — ручная операция;  
 специальные символы: е — соединитель, ж — терминатор

**Подэтапы второго этапа моделирования.** Рассмотрим подэтапы алгоритмизации модели системы и её машинной реализации.

1. *Построение логической схемы модели.* Рекомендуется строить модель по блочному принципу, т.е. в виде некоторой совокупности стандартных блоков, что обеспечит необходимую гибкость в процессе ее эксплуатации, особенно на стадии машинной отладки. Блоки бывают двух типов: основные и вспомогательные. Каждый основной блок соответствует некоторому реальному подпроцессу, имеющему место в моделируемой системе  $S$ , а вспомогательные блоки необходимы лишь для машинной реализации, фиксации и обработки результатов моделирования.

2. *Получение математических соотношений.* Одновременно с выполнением подэтапа построения логической схемы модели необходимо получить математические соотношения в виде явных функций, т.е. построить аналитические модели. Этот подэтап соответствует неявному заданию возможных математических соотношений на этапе построения концептуальной модели. Схема машинной модели  $M_M$  должна представлять собой полное отражение заложенной в модели концепции и иметь: а) описание всех блоков модели с их наименованиями; б) единую систему обозначений и нумерацию блоков; в) отражение логики модели процесса функционирования системы; г) задание математических соотношений в явном виде.

Таким образом, построенная машинная модель  $M_M$  системы будет иметь комбинированный характер, т.е. отражать аналитико-имитационный подход, когда часть процесса в системе описана аналитически, а другая часть имитируется соответствующими алгоритмами.

3. *Проверка достоверности модели системы.* Проверка модели на данном подэтапе должна дать ответ на вопрос, насколько логическая схема модели системы и используемые математические соотношения отражают замысел модели, сформированный на первом этапе. При этом проверяются: а) возможность решения поставленной задачи; б) точность отражения замысла в логической схеме; в) полнота логической схемы модели; г) правильность используемых математических соотношений.

4. *Выбор инструментальных средств моделирования.* На этом подэтапе необходимо окончательно решить вопрос о том, какую вычислительную машину (ЭВМ, АВМ, ГВК) и какое программное обеспечение целесообразно использовать для реализации модели системы  $S$ . Вопрос о выборе ЭВМ сводится к обеспечению следующих требований: а) наличие необходимых программных и технических средств; б) доступность выбранной ЭВМ для разработчика модели; в) обеспечение всех этапов реализации модели; г) возможность своевременного получения результатов.

5. *Составление плана выполнения работ по программированию.* План при использовании универсальной ЭВМ должен включать в себя:

а) выбор языка (системы) программирования модели; б) указание типа ЭВМ и необходимых для моделирования устройств; в) оценку примерного объема необходимой оперативной и внешней памяти; г) ориентировочные затраты машинного времени на моделирование; д) предполагаемые затраты времени на программирование и отладку программы на ЭВМ.

6. *Спецификация и построение схемы программы.* Спецификация программы — формализованное представление требований, предъявляемых к программе, которые должны быть удовлетворены при ее разработке, а также описание задачи, условий и эффекта действия без указания способа его достижения. Наличие логической блок-схемы модели позволяет построить схему программы, которая должна отражать: а) разбиение модели на блоки, подблоки и т.д.; б) особенности программирования модели; в) проведение необходимых изменений; г) возможности тестирования программы; д) оценку затрат машинного времени; е) форму представления входных и выходных данных. Схема программы зависит от выбранного языка: алгоритмического языка общего назначения или языка моделирования.

7. *Верификация и проверка достоверности схемы программы.* Верификация программы — доказательство того, что поведение программы соответствует спецификации на программу. На этом подэтапе проводится проверка соответствия каждой операции, представленной в схеме программы, аналогичной ей операции в логической схеме модели.

8. *Проведение программирования модели.* Если имеется адекватная схема программы, то программирование представляет собой работу только для программиста без участия и помощи со стороны разработчика модели. При использовании пакетов прикладных программ моделирования проводится непосредственная генерация рабочих программ для моделирования конкретного объекта, т.е. программирование модели реализуется в автоматизированном режиме.

9. *Проверка достоверности программы.* Это последняя проверка на этапе машинной реализации модели, которую необходимо проводить: а) обратным переводом программы в исходную схему; б) проверкой отдельных частей программы при решении различных тестовых задач; в) объединением всех частей программы и проверкой ее в целом на контрольном примере моделирования варианта системы  $S$ . На этом подэтапе необходимо также проверить оценки затрат машинного времени на моделирование.

10. *Составление технической документации по второму этапу.* Для завершения этапа машинной реализации модели  $M_M$  необходимо составить техническую документацию, содержащую: а) логическую схему моделирования и ее описание; б) адекватную схему программы и принятые обозначения; в) полный текст программы; г) перечень входных и выходных



величин с пояснением; д) инструкцию по работе с программой; е) оценку затрат машинного времени на моделирование с указанием требуемых ресурсов ЭВМ.

Таким образом, строится машинная модель  $M_M$ , с которой предстоит работать для получения необходимых результатов моделирования по оценке характеристик процесса функционирования системы  $S$  (задача анализа) или для поиска оптимальных структур, алгоритмов и параметров системы  $S$  (задача синтеза).

### 3.4. Получение и интерпретация результатов моделирования систем

На третьем этапе моделирования — этапе получения и интерпретации результатов моделирования — ЭВМ используется для проведения рабочих расчетов по составленной и отлаженной программе. Результаты этих расчетов позволяют проанализировать и сформулировать выводы о характеристиках процесса функционирования моделируемой системы  $S$ .

**Особенности получения результатов моделирования.** При реализации моделирующих алгоритмов на ЭВМ вырабатывается информация о состояниях процесса функционирования исследуемых систем  $z(t) \in Z$ . Эта информация является исходным материалом для определения приближенных оценок искомых характеристик, получаемых в результате машинного эксперимента, т.е. критериев оценки. *Критерий оценки* — это любой количественный показатель, по которому можно судить о результатах моделирования системы.

Часто используют более простые критерии оценки, например, вероятность определенного состояния системы в заданный момент времени  $t^* \in [0, T]$ , отсутствие отказов и сбоев в системе на интервале  $[0, T]$  и т. д. При интерпретации результатов моделирования вычисляются различные статистические характеристики закона распределения критерия оценки.

Рассмотрим общую схему фиксации и обработки результатов моделирования системы, которая приведена на рис. 3.4, на интервале времени  $[0, T]$ . В общем случае критерием интерпретации результатов моделирования является нестационарный случайный  $n$ -мерный процесс  $\vec{q}(t)$ ,  $0 \leq t \leq T$ . Состояние модели проверяется каждые  $\Delta t$  временных единиц, т.е. используется «принцип  $\Delta t$ ». При этом вычисляют значения  $\vec{q}(j\Delta t)$ ,  $j = \overline{0, k}$ . О свойствах случайного процесса  $\vec{q}(t)$  судят по свойствам случайной последовательности  $\vec{q}(j\Delta t)$ ,  $j = \overline{0, k}$ , или, иначе говоря, по свойствам  $m$ -мерного вектора вида

$$\vec{q} = (\vec{q}(0), \vec{q}(\Delta t), \dots, \vec{q}[(k-1)\Delta t], \vec{q}(T)), m = n(k+1), T = k\Delta t.$$

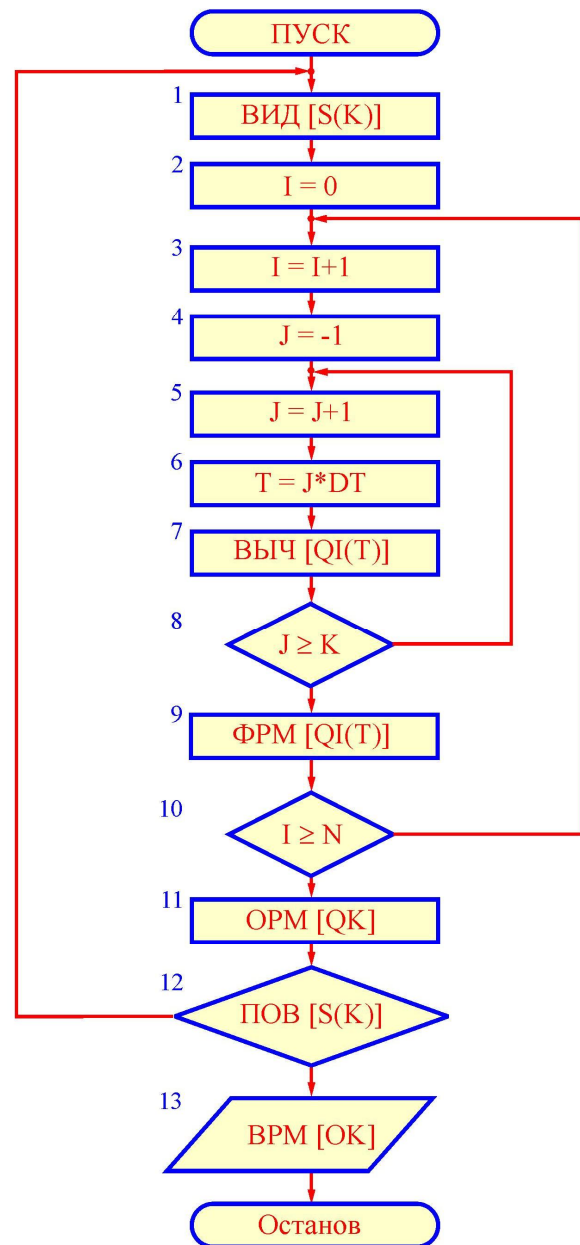


Рис. 3.4. Алгоритм фиксации и обработки результатов моделирования системы

Процесс функционирования системы  $S$  на интервале  $[0, T]$  моделируется  $N$ -кратно с получением независимых реализаций  $\vec{q}_i, i = \overline{1, N}$  вектора  $\vec{q}$ . Работа модели на интервале  $[0, T]$  называется *прогоном модели*.

На схеме, изображенной на рис. 3.4, обозначено:  $I \equiv i; J \equiv j; K \equiv k; N \equiv N; T \equiv t; DT \equiv \Delta t; Q \equiv q$ .

В общем случае алгоритмы фиксации и статистической обработки данных моделирования содержат три цикла.

*Внутренний цикл* (блоки 5—8) позволяет получить последовательность  $\vec{q}_i(t) = \vec{q}(j\Delta t), j = \overline{0, k}$  в моменты времени  $t = 0, \Delta t, 2\Delta t, \dots, k\Delta t = T$ .

Основной блок 7 реализует процедуру вычисления последовательности  $\vec{q}_i(t)$ : ВЧ[ $QI/(T)$ ]. Именно в этом блоке имитируется процесс функционирования моделируемой системы  $S$  на интервале времени  $[0, T]$ .

*Промежуточный цикл* (блоки 3—10), в котором организуется  $N$ -кратное повторение прогона модели, позволяющее после соответствующей статистической обработки результатов судить об оценках характеристик моделируемого варианта системы. Окончание моделирования варианта системы  $S$  может определяться не только заданным числом реализации (блок 10), как это показано на схеме, но и заданной точностью результатов моделирования. В этом цикле содержится блок 9, реализующий процедуру фиксации результатов моделирования по  $i$ -му прогону модели  $\vec{q}_i(t)$  ФРМ[ $QI/(T)$ ].

*Внешний цикл* (блоки 1—12) охватывает оба предшествующих цикла и дополнительно включает блоки 1, 2, 11, 12, управляющие последовательностью моделирования вариантов системы  $S$ . Здесь организуется поиск оптимальных структур, алгоритмов и параметров системы  $S$ , то есть блок 11 обрабатывает результаты моделирования исследуемого  $k$ -го варианта системы ОРМ[ $QK$ ], блок 12 проверяет удовлетворительность полученных оценок характеристик процесса функционирования системы  $\vec{q}_i(t)$  требуемым (ведёт поиск оптимального варианта системы ПОВ[ $S(K)$ ]), блок 1 изменяет структуру, алгоритмы и параметры системы  $S$  на уровне ввода исходных данных для очередного  $k$ -го варианта системы ВИД[ $S(K)$ ]. Блок 13 реализует функцию выдачи результатов моделирования по каждому  $k$ -му варианту модели системы  $S_k$ , т.е. ВРМ[ $QK$ ].

Рассмотренная система позволяет вести статистическую обработку результатов моделирования в наиболее общем случае при нестационарном критерии  $\vec{q}(t)$ .

**Подэтапы третьего этапа моделирования.** Прежде чем приступить к последнему, третьему, этапу моделирования системы, необходимо для его успешного проведения иметь чёткий план действий, сводящийся к выполнению следующих основных подэтапов.

1. *Планирование машинного эксперимента с моделью системы.* Планирование машинного эксперимента с указанием комбинаций переменных и параметров позволяет получить максимальный объём необходимой информации об объекте моделирования при минимальных затратах машинных ресурсов.

2. *Определение требований к вычислительным средствам.* Необходимо сформулировать требования по времени использования вычислительных средств, т.е. составить график работы на одной или нескольких ЭВМ, а также указать те внешние устройства ЭВМ, которые потребуются при моделировании.

3. *Проведение рабочих расчётов.* Рабочие расчёты на ЭВМ включают в себя: а) подготовку наборов исходных данных для ввода в ЭВМ; б) проверку исходных данных, подготовленных для ввода; в) проведение расчётов на ЭВМ; г) получение выходных данных, т.е. результатов моделирования.

4. *Анализ результатов моделирования системы.* Планирование машинного эксперимента с моделью  $M_M$  позволяет вывести необходимое количество выходных данных и определить метод их анализа. Вычисление статистических характеристик перед выводом результатов на ЭВМ повышает эффективность применения машины и сводит к минимуму обработку выходной информации после её вывода на ЭВМ.

5. *Представление результатов моделирования.* Форма представления окончательных результатов моделирования может быть в виде таблиц, графиков, диаграмм, схем и т.п. Наиболее простой формой считаются таблицы, хотя графики более наглядно иллюстрируют результаты моделирования системы  $S$ .

6. *Интерпретация результатов моделирования.* Интерпретация результатов – переход от информации, полученной в результате машинного эксперимента с моделью  $M_M$ , к информации применительно к объекту моделирования, на основании которой будут делаться выводы относительно характеристик процесса функционирования исследуемой системы  $S$ .

7. *Подведение итогов моделирования и выдача рекомендаций.* При подведении итогов моделирования должны быть отмечены главные особенности результатов, полученных в соответствии с планом эксперимента над моделью  $M_M$ , проведена проверка гипотез и предложений и сделаны выводы на основании этих результатов, сформулированы рекомендации по практическому использованию результатов моделирования.

8. *Составление технической документации по третьему этапу.* Эта документация должна включать в себя: а) план проведения машинного эксперимента; б) наборы исходных данных для моделирования; в) результаты моделирования системы; г) анализ и оценку результатов моделирования; д) выводы по полученным результатам моделирования; е) указания путей дальнейшего совершенствования машинной модели и возможных областей ее приложения.

Таким образом, процесс моделирования системы  $S$  сводится к выполнению перечисленных этапов моделирования. На этапе построения концептуальной модели  $M_K$  проводится исследование моделируемого объекта, определяются необходимые аппроксимации и строится обобщенная схема модели, которая преобразуется в машинную модель  $M_M$  на втором этапе моделирования путем последовательного построения логической схемы модели и схемы программы. На последнем этапе моделирования проводят рабочие расчеты на ЭВМ, получают и интерпретируют результаты моделирования системы  $S$ .

## СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Альянах И.Н. Моделирование вычислительных систем / Л.: Машиностроение, 1988. 233 с.

Введение в математическое моделирование: учеб. пособие для вузов / под ред. П.В.Тарасова. М.: Интермет Инжиниринг, 2000. 200 с.

Ивченко Г.И. Математическая статистика: учеб. пособие для вузов / Г.И. Ивченко, Ю.И. Медведев. М.: Высш. шк., 1984. 248 с.

Мурашев В. П. Расчет и моделирование электромеханических систем: Учеб. пособие для студентов специальностей 210200, 170400/ В. П. Мурашев; Моск. гос. ун-т леса. 2-е изд., стер. М.: МГУЛ, 2002. 136 с.

Косоруков О. А. Исследование операций: учебник для студентов вузов/ под ред. Н. П. Тихомирова; Рос. экон. акад. им. Г. В. Плеханова. М.: Экзамен, 2003. 448 с.

Обвинцев В. В. Информационное обеспечение лесопромышленного производства: учеб. пособие для студентов вузов. Урал. гос. лесотехн. ун-т. Екатеринбург: УГЛТУ, 2005. 203 с.

Советов Б.Я. Моделирование систем : учеб. для вузов / Б.Я. Советов, С.А. Яковлев. М. : Высш. шк., 2001. 343 с.

Советов Б.Я. Моделирование систем : учеб. для вузов / Б.Я. Советов, С.А. Яковлев. 2-е изд. М.: Высшая школа, 1998. 319 с.

Советов Б. Я. Моделирование систем: практикум : учеб. пособие для студентов вузов/ Б. Я. Советов, С. А. Яковлев. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Высшая школа, 2003. 295 с.

Тарасик В.П. Математическое моделирование технических систем: учеб. для вузов. М.: Наука, 1997. 600 с.

Томашевский В. Н. Имитационное моделирование в среде GPSS / В. Н. Томашевский, Е. Г. Жданова. М.: Бестселлер, 2003. 416 с.

Шеннон Р. Имитационное моделирование систем – искусство и наука. М.: Мир, 1978. 308 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

### Занятия 7, 8

3. ФОРМАЛИЗАЦИЯ И АЛГОРИТМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМ .....	3
3.1. Методика разработки и машинной реализации моделей систем..	3
3.2. Построение и формализация концептуальных моделей систем...	6
3.3. Алгоритмизация моделей систем и их машинная реализация.....	11
3.4. Получение и интерпретация результатов моделирования систем	16
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ .....	20